

Vortex wake disturbing influence measuring process involves measuring wind speed from aircraft ahead, reporting data, setting turbulence pattern, etc.

Publication number: DE10039109

Publication date: 2002-02-28

Inventor: SCHAENZER GUNTHER (DE)

Applicant: SCHAENZER GUNTHER (DE)

Classification:

- international: **B64C23/06; B64F1/36; B64C23/00; B64F1/00; (IPC1-7): B64C3/00**

- european: B64C23/06; B64F1/36

Application number: DE20001039109 20000807

Priority number(s): DE20001039109 20000807

Report a data error here

Abstract of DE10039109

The vortex wake influence measuring process involves measuring the wind speed on board from aircraft ahead of a first aircraft to produce turbulence data, reporting the measured or predicted data on flight path positions to a ground station, setting the turbulence pattern in the flight path, finding the strength of the vortex wake (5) from the first aircraft on the basis of design data, and thus the effect it will have on a second aircraft following it.

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 100 39 109 A 1**

⑤① Int. Cl.⁷:
B 64 C 3/00

②① Aktenzeichen: 100 39 109.5
②② Anmeldetag: 7. 8. 2000
④③ Offenlegungstag: 28. 2. 2002

DE 100 39 109 A 1

⑦① Anmelder:
Schänzer, Gunther, Prof. Dr.-Ing., 38108
Braunschweig, DE

⑦④ Vertreter:
GRAMM, LINS & PARTNER, 38122 Braunschweig

⑦② Erfinder:
gleich Anmelder

⑤⑥ Entgegenhaltungen:
NORRIS, G., WARWICK, G.: "Shear Progress", in
GB-Z.: Flight international, Heft 22-28,
April 1992, S. 29-31;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Verfahren und Einrichtung zur Bestimmung des störenden Einflusses einer Wirbelschleppe

⑤⑦ Für die Bestimmung des störenden Einflusses einer von einem ersten Flugzeug erzeugten Wirbelschleppe für ein zweites, nachfolgendes Fahrzeug gelingt in einer auf den Einzelfall angepassten Weise durch folgende Verfahrensschritte:

- Durchführung von so häufigen Messungen der Windgeschwindigkeit an Bord von auf dem Flugweg des ersten Flugzeugs vorher fliegenden Flugzeugen, dass aus den Änderungen der Messergebnisse Daten für die Turbulenz ableitbar sind
 - Übermittlung der gemessenen und/oder vorausgewerteten Daten auf Positionen des Flugweges an eine Bodenstation
 - Erstellung eines Verlaufs der Turbulenz auf dem Flugweg
 - Bestimmung der Stärke der von dem ersten Flugzeug erzeugten Wirbelschleppe unter Verwendung konstruktiver Daten des Typs des ersten Flugzeugs.
- Damit ist eine dynamische, an den Einzelfall angepasste Staffelung hintereinander fliegender Flugzeuge möglich, wodurch beispielsweise die Kapazität von Verkehrsflughäfen erhöht wird.

DE 100 39 109 A 1

Beschreibung

- [0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung des störenden Einflusses einer von einem ersten Flugzeug erzeugten Wirbelschlepe für ein zweites, auf dem Flugweg nachfolgendes Flugzeug.
- 5 [0002] Die Erfindung betrifft ferner eine Einrichtung zur Bestimmung des störenden Einflusses einer von einem ersten Flugzeug erzeugten Wirbelschlepe für ein zweites, auf dem Flugweg nachfolgendes Flugzeug.
- [0003] Das stetig steigende Passagieraufkommen im Luftverkehr führt dazu, dass auf bestimmten Strecken immer größere Flugzeuge eingesetzt werden. Darüber hinaus steigt die Häufigkeit des Anfliegens wichtiger Ziele, sodass zunehmend aufgrund der Überschreitung einer kritischen Passagierzahl Direktverbindungen statt der früheren Umsteigeverbindungen angeboten werden. Hierdurch kommt es zu einer Erhöhung der Start- und Landefrequenzen der Flughäfen, die jedoch inzwischen zumindest in den Hauptverkehrszeiten an ihre Kapazitätsgrenze angelangt sind bzw. diese schon weit überschritten haben. Für einen größeren Verkehrsflughafen lässt sich abschätzen, dass allein durch die Erhöhung der Kapazität um eine Flugbewegung pro Stunde jährliche zusätzliche Gewinne in der Größenordnung von 10 Mio. DM zu erzielen wären.
- 15 [0004] Die Kapazität der Flughäfen wird nicht nur durch die Passagierabfertigung oder die Bodenabfertigung der Flugzeuge bestimmt, sondern auch durch die Tatsache, dass die landenden und startenden Flugzeuge aufgrund ihrer Wirbelschleppen erhebliche Turbulenzen erzeugen, die die Flugstabilität zu nahe folgender Flugzeuge beeinträchtigen und daher ein Gefährdungspotential bilden. Die Gefährdung der nachfolgenden Flugzeuge durch Wirbelschleppen wird durch gesetzlich limitierte Mindestabstände verhindert, die häufig den entscheidenden kapazitätsbeschränkenden Faktor eines Verkehrsflughafens bilden.
- 20 [0005] Die Mindestabstände zwischen aufeinanderfolgenden Flugzeugen wird in der Praxis nach einer Einteilung der Verkehrsflugzeuge in drei Gewichtskategorien festgelegt. Ein Flugzeug mit einer höchstzulässigen Startmasse von 136 000 kg oder mehr gilt als "schwer", mit einer höchstzulässigen Startmasse von weniger als 136 000 kg und mehr als 7 000 kg als "mittelschwer" und mit einer höchstzulässigen Startmasse von 7 000 kg oder weniger als "leicht". In einer
- 25 Tabelle sind die Staffellingsmindestwerte in nautischen Meilen (NM) bzw. in Sekunden für verschiedene Kombinationen eines voraus fliegenden und eines nachfolgenden Flugzeuges angegeben.
- [0006] Diese grobe Kategorisierung hat in der Praxis in einigen Fällen zu Fehlern geführt, da bestimmte Flugzeugtypen eine wesentlich stärkere Wirbelschlepe produzieren, als ihrem höchstzulässigen Startgewicht entspricht. Diese Flugzeuge mussten daher in die nächst höhere Kategorie klassifiziert werden. Im Übrigen werden durch diese schematische
- 30 Behandlung aus Sicherheitsgründen Mindestabstände eingehalten, die im Einzelfall deutlich oberhalb des tatsächlich erforderlichen Abstandes liegen.
- [0007] Es ist versucht worden, die tatsächliche Position und Stärke von Wirbelschleppen unter anderem mit optischen Verfahren, wie die Laser-Doppler-Anemometrie, zu identifizieren. Diese Verfahren liefern jedoch nur Ergebnisse in einem beschränkten Bereich.
- 35 [0008] Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Problemstellung zugrunde, die aus Sicherheitsgründen einzuhaltenen Wirbelschleppenabstände durch eine Anpassung an die tatsächlich herrschenden Verhältnisse zu verkürzen, um dadurch die Kapazität eines Verkehrsflughafens zu vergrößern.
- [0009] Zur Lösung dieses Problems weist erfindungsgemäß ein Verfahren der eingangs erwähnten Art folgende Verfahrensschritte auf:
- 40
- Durchführung von so häufigen Messungen der Windgeschwindigkeit an Bord von auf dem Flugweg des ersten Flugzeugs vorher fliegenden Flugzeugen, dass aus den Änderungen der Messergebnisse Daten für die Turbulenz ableitbar sind
 - Übermittlung der gemessenen und/oder voraus gewerteten Daten auf Positionen des Flugweges an eine Bodenstation
 - 45 - Erstellung eines Verlaufs der Turbulenz auf dem Flugweg durch die Bodenstation
 - Bestimmung der Stärke der von dem ersten Flugzeug erzeugten Wirbelschlepe unter Verwendung konstruktiver Daten des Typs des ersten Flugzeugs
 - Abschätzung des Zerfalls der Wirbelschlepe unter dem Einfluss der bestimmten Turbulenz auf dem Flugweg
 - 50 - Bestimmung einer Gefährdungsschwelle der Stärke der Wirbelschlepe für das nachfolgende zweite Flugzeug.
- [0010] Das erfindungsgemäße Verfahren beruht auf der Erkenntnis, dass die Lebensdauer von Wirbelschleppen stark abhängig ist von den atmosphärischen Wetterverhältnissen, insbesondere Wind- und Turbulenzbedingungen. Eine Wirbelschlepe hat in einer ruhigen Umgebung eine bedeutend längere Lebensdauer als in einer turbulenten Umgebungsluftströmung. Jeweils aktuelle Informationen über atmosphärische Turbulenzen im Bereich der Flugbahn sind an Verkehrsflughäfen nicht verfügbar. Eine bekannte Maßnahme besteht darin, in der Nähe von Verkehrsflughäfen Wetterballons aufsteigen zu lassen, mit denen meteorologische Daten, unter anderem Winddaten, gemessen werden. Diese gemessenen Daten lassen aber keine verlässlichen Prognosen über die Stunden später bestehende Wettersituation zu. Erfindungsgemäß wird ausgenutzt, dass beispielsweise für instrumentengesteuerte Landeanflüge von allen landenden Flugzeugen im Wesentlichen der gleiche Landekorridor verwendet werden muss. Es ist grundsätzlich bekannt, von Bordensensoren der Flugzeuge ermittelte Wetterdaten auf eine Bodenstation zu übertragen, um daraus beispielsweise den Einfluss von Seitenwind auf die nach einer gewissen Zeit noch bestehende Existenz von Wirbelschleppen zu berücksichtigen. Erfindungsgemäß werden jedoch nicht die für die Ermittlung einer mittleren Windgeschwindigkeit erforderlichen Daten gemessen und übertragen, sondern es wird die Windgeschwindigkeit mit den bordeigenen Sensoren mit einer derartigen
- 65 Häufigkeit gemessen, dass aus der Fluktuation der Windgeschwindigkeit Daten über atmosphärische Turbulenzen entstehen, die als Roh-Messwerte oder in vorausgewerteter Form von dem Flugzeug auf die Bodenstation übertragen werden. Auf diese Weise kann die Bodenstation ein immer wieder aktualisiertes Bild der Turbulenz sowie Prognosen für eine kurzfristige zu erwartende Turbulenz auf dem Flugweg erstellen und für die Abschätzung des Zerfalls der Wirbel-

schleppe unter dem Einfluss der Turbulenzen auf dem Flugweg verwenden.

[0011] Auf diese Weise gelingt eine gegenüber den bisher verwendeten groben Klassifizierungen deutlich verbesserte Abschätzung des Zerfalls einer Wirbelschleppe, sodass für das nachfolgende zweite Flugzeug regelmäßig eine angemessene Wirbelschleppenstaffelung mit der erforderlichen Sicherheit festgestellt werden kann.

[0012] Selbstverständlich kann bei der Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zusätzlich der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Existenz der Wirbelschleppe auf dem Flugweg berücksichtigt werden. Ein starker Seitenwind treibt die Wirbelschleppe unter Umständen schnell aus dem Flugweg für das nachfolgende Flugzeuge hinaus.

[0013] In einer unten noch näher erläuterten Weise wird vorzugsweise die Abschätzung des Zerfalls der Wirbelschleppe mit Hilfe eines numerischen Näherungsmodells vorgenommen.

[0014] Zweckmäßig ist es, bei dem erfindungsgemäßen Verfahren die Gefährdungsschwelle für das nachfolgende zweite Flugzeug in Abhängigkeit vom Typ des zweiten Flugzeuges zu bestimmen.

[0015] Zur Lösung des oben erwähnten Problems ist ferner eine Einrichtung der oben erwähnten Art versehen mit

- einem Eingang zur Übernahme von einer atmosphärischen Turbulenz kennzeichnenden Messdaten, die von vorher auf dem Flugweg fliegenden Flugzeugen aufgenommen und übermittelt worden sind,
- einer Bearbeitungsstufe zur Erstellung eines Verlaufs der Turbulenz auf dem Flugweg,
- einer Speichereinrichtung zum Abspeichern der konstruktiven Daten von Flugzeugtypen,
- einer Stufe zum Erstellen der Stärke der von dem ersten Flugzeug erzeugten Wirbelschleppe unter Berücksichtigung der konstruktiven Daten des Typs des ersten Flugzeuges,
- einer Auswertungseinrichtung zur Abschätzung des Zerfalls der Wirbelschleppe unter dem Einfluss der bestimmten Turbulenz auf dem Flugweg,
- einer Auswertungseinrichtung zur Bestimmung der Gefährdungsschwelle der Stärke der Wirbelschleppe für das nachfolgende zweite Flugzeug unter Berücksichtigung dessen konstruktiver Daten.

[0016] Die Erfindung soll im Folgenden anhand von in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert werden. Es zeigen:

[0017] Fig. 1 ein Blockschaltbild für die Datengewinnung im Flugzeug,

[0018] Fig. 2 ein Blockschaltbild für die Datenverarbeitung in einer Bodenstation,

[0019] Fig. 3 eine Darstellung des Aufbaus und des Zerfalls einer Wirbelschleppe,

[0020] Fig. 4 eine schematische Darstellung des Ansatzes zur Erstellung eines mathematischen Modells einer Wirbelschleppe,

[0021] Fig. 5 eine Verifikation eines mathematischen Modells an einer Simulation der Einzelwirbel,

[0022] Fig. 6 einen Vergleich zwischen den Daten des mathematischen Modells und Messergebnissen.

[0023] Der Ansatz für eine analytische Berechnung der Wirbelschleppen geht davon aus, dass die Gesamtzirkulation eines Flugzeuges Γ_0 als Maß für die tatsächliche Stärke der Wirbelschleppen abgeschätzt werden kann.

$$\Gamma_0 = \frac{A}{\rho \cdot b \cdot V \cdot k} \quad (1)$$

[0024] Der Faktor k berücksichtigt die Verteilung der Zirkulation entlang der Spannweite. Der quantitative Einfluss der Flugzeugparameter wird in dieser Formel deutlich: Unter der Voraussetzung, dass der Auftrieb A dem Fluggewicht entspricht, wird die Wirbelstärke bei gleicher Luftdichte ρ durch das Verhältnis von Gewicht zu Spannweite b und Fluggeschwindigkeit V bestimmt. Letztere ist für Flugzeuge im Landeanflug in der Regel vorgegeben, sodass nur die aktuelle Flugzeugmasse sowie die Spannweite, also letztlich der Flugzeugtyp, variable Faktoren sind.

[0025] Erfindungsgemäß bildet eine genaue Prognose der Wirbelausbreitung und -alterung zusammen mit der Berücksichtigung von Flugzeugmasse und -typ die Grundlage für eine dynamische Festlegung der Staffelungsabstände. Während die Wirbelausbreitung hauptsächlich durch die Windrichtung bestimmt wird, stellt die Turbulenzintensität der Atmosphäre den wesentlichen Parameter für die Beurteilung des Zerfalls und damit der Stärke von Wirbeln der Wirbelschleppe dar.

[0026] Die atmosphärische Turbulenz σ_w ist definiert als die Standardabweichung (Wurzel aus der Varianz) der Windgeschwindigkeit. Mit dem Mittelwert der Windgeschwindigkeit V_w über einen Zeitraum D

$$\bar{V}_w = \frac{1}{D} \int_0^D V_w(t) dt \quad (2)$$

berechnet sich die Turbulenz zu

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{D} \int_0^D [V_w(t) - \bar{V}_w(t)]^2 dt} \quad (3)$$

[0027] Die Windgeschwindigkeit V_w kann dabei direkt als Differenz aus Fluggeschwindigkeit V und Bahngeschwindigkeit V_k ermittelt werden:

$$\underline{V}_w = \underline{V} - \underline{V}_k \quad (4)$$

[0028] Die hierfür benötigten Sensoren zur Bestimmung der Fluggeschwindigkeit \underline{V} und der Bahngeschwindigkeit \underline{V}_k sind heutzutage in jedem Verkehrsflugzeug verfügbar. In der Regel bekommt der Pilot auch bereits entsprechend berechnete Windinformationen.

[0029] Für die Errechnung der Turbulenzdaten muss daher lediglich eine ausreichend hohe Datenrate gewährleistet sein, um aus der Gleichung (3) – gegebenenfalls mit Hilfe eines neuen Rechners – die Turbulenzdaten zu ermitteln.

[0030] Die Bestimmung der Turbulenz ist allerdings auch unter Benutzung anderer Parameter (z. B. Richardson-Zahl) möglich.

[0031] Das aktuelle Bild der Wind- und Turbulenzsituation kann nun in die Atmosphären- und Wettermodelle der Meteorologen eingebracht werden. Aus der Vorhersage der Windgeschwindigkeit lässt sich eine Vorhersage der Wirbelausbreitung gewinnen. Die Wirbellebensdauer wird durch die Zirkulationsabnahme infolge Turbulenz bestimmt, wie sie nach verschiedenen in der Literatur angegebenen Ansätzen berechnet werden kann. Beispielsweise gilt nach DONALDSON

$$\Gamma = \Gamma_{0e} - 3.2 \frac{\sigma_w t}{\pi \cdot b} \quad (5)$$

wobei b die Spannweite des wirbelerzeugenden Flugzeuges darstellt, die aufgrund der Information über den Flugzeugtyp aus einer geeigneten Datenbank entnommen werden kann.

[0032] Fig. 1 verdeutlicht ein Blockschaltbild für die bordeigene Gewinnung der für das erfindungsgemäße Verfahren verwendbaren Daten.

[0033] Mit aerodynamischen Sensoren 1 werden Luftdaten gemessen. Diese werden kombiniert mit Daten eines Navigationssystems 2, das Trägheitssensoren und/oder Satellitennavigationsempfänger enthalten kann. In einer Auswertungseinrichtung 3, die durch einen separaten Rechner gebildet sein kann, werden die Turbulenzdaten, Winddaten und Daten über die Flughöhe bzw. Flugposition zusammengestellt. In einer Datenaufbereitung 4, die Teil des selben separaten Rechners sein kann, werden diese Daten zusammen mit Daten aus einem Flugmanagementsystem (FMS) 5 (z. B. den Flugzeugtyp und die aktuelle Flugzeugmasse) aufbereitet und dann z. B. über eine Funkdatenverbindung 6 übertragen.

[0034] Fig. 2 verdeutlicht, dass die über die Funkdatenverbindung 6 übertragenen Daten in einer Bodenstation in einer Auswertungseinrichtung 7 zur Erstellung einer Wirbelprognose bezüglich der Ausbreitung und der Lebensdauer der Wirbelschleppe gelangen. Mit Randbedingungen eines Anflugkoordinators bzw. der Rollkontrolle 8 des Flughafens werden in einem Rechner 9 Stafflungsempfehlungen erstellt, die für die Rollkontrolle beim Start bzw. für die Anflugkoordination bei der Landung unmittelbar verwendbar sind. Für die Stafflungsempfehlungen werden die FMS-Daten der nachfolgenden Flugzeuge berücksichtigt.

[0035] Im Folgenden wird erläutert, wie mit Hilfe numerischer Verfahren die Alterung und Bewegung der Wirbelschleppe bis in Bodennähe berechnet werden kann, um eine Prognose für einen Zeitraum von etwa 30 Minuten auf der Basis einfacher Parameter des wirbelerzeugenden und des nachfolgenden Flugzeuges sowie der aktuellen Wetterdaten aus Boden- und Flugmessungen zu ermöglichen.

[0036] Jedes in Bewegung befindliche Flugzeug erzeugt Wirbelschleppen. Die Wirbel haben unmittelbar nach der Erzeugung ihre maximale Intensität, die aufgrund des Energieaustausches mit der umgebenden Atmosphäre kontinuierlich abnimmt.

[0037] Fig. 3 verdeutlicht die Aufrollphase der Wirbelschleppe, die dann "altert" und in eine nicht mehr kritische Luftbewegung zerfällt. Das Maß der Gefährdung durch eine Wirbelschleppe ist von vielen Parametern abhängig. Das wirbelerzeugende Flugzeug beeinflusst unter anderem durch seine Flugmasse und den Flugzustand (z. B. der Fluggeschwindigkeit und dem Lastvielfachen) die Stärke der entstehenden Wirbelschleppe. Das zeitliche Verhalten von Wirbelschleppen ist abhängig von Atmosphärenparametern, wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Atmosphärenturbulenz. Die Reaktion des nachfolgenden, einfliegenden Flugzeuges ist wiederum abhängig von dessen Geometrie, Masse, Flugzustand und der Reaktionszeiten des Piloten bzw. des Autopiloten.

[0038] Für das erfindungsgemäße Verfahren ist es besonders zweckmäßig, Wirbelschleppen mathematisch zu modellieren.

[0039] Jedes Flugzeug erzeugt hinter seiner Tragfläche eine Wirbelschicht in der Atmosphäre, die sich zur Wirbelschleppe aufrollt, wie dies Fig. 4 zeigt. Aus zahlreichen gebundenen Einzelwirbeln 1 mit einer schematisch dargestellten gebundenen Zirkulationsverteilung 2 entstehen freie Einzelwirbel 3, deren Zirkulationsverteilung 4 ebenfalls schematisch eingezeichnet ist. Im weiteren Verlauf rollen sich die Einzelwirbel durch gegenseitige Beeinflussung zur Wirbelschleppe 5 auf und induzieren eine Absinkbewegung der Wirbelschleppe.

[0040] Mit Hilfe einer Großrechneranlage wurde eine rechenzeitintensive Einzelwirbelsimulation vorgenommen. Die Wirbelschicht hinter dem Tragflügel wurde in 1 500 Einzelwirbeln 4 diskretisiert. Die bei dieser Simulation ermittelten Translationsgeschwindigkeiten sind in Fig. 5 als gestrichelte Kurve eingezeichnet.

[0041] Als analytisches Wirbelmodell für Echtzeitanwendungen wurde eine Lösung der NAVIER-STOKESschen Bewegungsgleichungen, der OSEEN-Wirbel zugrunde gelegt, erweitert und an die Ergebnisse der Einzelwirbelsimulation angepasst. Die sich daraus ergebende Kurve für den modifizierten OSEEN-Wirbel ist in Fig. 5 als durchgehende Linie dargestellt.

[0042] Das mathematische Modell für die Errechnung der Translationsgeschwindigkeit ist in der nachfolgenden Gleichung

$$V_{(r,t,\sigma)} = \frac{\Gamma_0}{2\pi r} \left(1 - e^{-\frac{r^2}{A_1(t)^2}} \right) \cdot A_4(t) (\arctan(A_2(t) \cdot r) + A_3(t)) \cdot e^{-0,4 \frac{\sigma \cdot t}{s'}} \quad (6)$$

dargestellt und besteht aus drei Termen, nämlich den OSEENSchen Wirbeln, die Erweiterung des Wirbelmodells durch Anpassung an die Einzelwirbelsimulation und durch die Ergänzung eines Dissipationsterms nach Donaldson, der den Zerfall des Wirbels unter Berücksichtigung der Turbulenz σ wiedergibt. Der Parameter s' beschreibt hier den halben Abstand der Randwirbel nach der Aufrollphase. Die Alterung der Wirbel von Flugzeugen großer Spannweite erfolgt somit langsamer als bei Flugzeugen geringer Spannweite. Der Einfluss der Atmosphärenturbulenz fließt über die Standardabweichung der Turbulenz σ in die Formel ein.

[0043] Fig. 6 gibt den Verlauf der maximal im Wirbel auftretenden Geschwindigkeiten über der Zeit für Standardabweichungen der Turbulenzgeschwindigkeit σ zwischen 0 und 0,8 m/s im Vergleich zu Messungen wieder. Die Darstellung zeigt einen erheblichen Einfluss der Atmosphärenturbulenz auf die Wirbellebensdauer und eine gute Übereinstimmung mit den Messungen.

[0044] Durch Einbringen des aktuellen Bilds der Wind- und Turbulenzsituation lässt sich somit eine Vorhersage der Wirbelausbreitung und der Wirbellebensdauer gewinnen. Hierdurch lässt sich eine individuelle Staffelung der Flugzeuge errechnen, die sowohl die Daten des voraus fliegenden als auch des nachfolgenden Flugzeugs mit einbezieht. Hierdurch gelingt eine Aufhebung der bisherigen starren Klasseneinteilung zugunsten einer individuellen Beurteilung der aktuellen Massenverhältnisse.

[0045] Dabei müssen die Staffelungsabstände so gewählt werden, dass die Intensität der Wirbel aufgrund des Energieaustausches mit der umgebenden Atmosphäre soweit abgenommen hat, dass keine Gefährdung für das nachfolgende Flugzeug auftritt bzw. die Wirbelschleppe den Flugbahnbereich verlassen hat. Beim Einflug in die Wirbelschleppe eines voraus fliegenden Flugzeuges werden entlang der Spannweite des einfliegenden Flugzeuges unterschiedliche Zusatzanströmwinkel und -geschwindigkeiten induziert. Auf die resultierenden lokalen Antriebsänderungen reagiert das Flugzeug mit Translations- und Rotationsbewegungen. Bei der Beurteilung sicherer Staffelungsabstände ist die Definition der Gefährdungsgrenze durch Wirbelschleppen von entscheidender Bedeutung. Die absolute Gefährdungsgrenze wird erreicht, wenn die wirbelinduzierenden Zusatzkräfte und -momente die Steuerkapazität des einfliegenden Flugzeugs überschreiten.

[0046] Dabei reichen rein stationäre Betrachtungen jedoch allein nicht aus, um das Gefährdungsmaß zu beurteilen. Die Gefährdung ergibt sich erst aus dem dynamischen Antwortverhalten des Flugzeugs auf die Anregung, wobei die Reaktion des Piloten und der Einfluss des Flugregelungssystems mit betrachtet werden muss.

[0047] Die Gefährdungen können in bekannten Echtzeit-Simulationen mit Piloten untersucht werden. Dabei ist in Betracht zu ziehen, dass eine Steuerung von Hand im Vergleich zur automatischen Steuerung einen zusätzlichen unbekannten Faktor darstellt, da Zeitverzögerungen auftreten können und Reaktionen von Piloten im Allgemeinen nicht vollständig reproduzierbar sind. Derartige Untersuchungen sind jedoch geeignet, unter Berücksichtigung der erforderlichen Sicherheitstoleranzen die Gefährdungsschwelle anzugeben, unterhalb derer das Risiko von unbeherrschbaren Flugzuständen durch Wirbelschleppen eliminiert ist.

[0048] Durch das erfindungsgemäße Verfahren lässt sich somit eine dynamische und an die aktuellen Situationen angepasste Staffelung aufeinander folgender Flugzeuge erreichen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung des störenden Einflusses einer von einem ersten Flugzeug erzeugten Wirbelschleppe für ein zweites, nachfolgendes Flugzeug, mit folgenden Verfahrensschritten:

- Durchführung von so häufigen Messungen der Windgeschwindigkeit an Bord von auf dem Flugweg des ersten Flugzeugs vorher fliegenden Flugzeugen, dass aus den Änderungen der Messergebnisse Daten für die Turbulenz ableitbar sind
- Übermittlung der gemessenen und/oder vorausgewerteten Daten auf Positionen des Flugweges an eine Bodenstation
- Erstellung eines Verlaufs der Turbulenz auf dem Flugweg
- Bestimmung der Stärke der von dem ersten Flugzeug erzeugten Wirbelschleppe unter Verwendung konstruktiver Daten des Typs des ersten Flugzeugs
- Abschätzung des Zerfalls der Wirbelschleppe unter dem Einfluss der Turbulenz auf dem Flugweg
- Bestimmung einer Gefährdungsschwelle der Stärke der Wirbelschleppe für das nachfolgende zweite Flugzeug.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem zusätzlich der Einfluss der Windgeschwindigkeit berücksichtigt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Abschätzung des Zerfalls der Wirbelschleppe mit Hilfe eines numerischen Näherungsmodells vorgenommen wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem die Gefährdungsschwelle für das nachfolgende zweite Flugzeug in Abhängigkeit vom Typ des zweiten Flugzeugs bestimmt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem aus den aufgrund der Messergebnisse übermittelten Daten Prognosen für die künftige Turbulenz erstellt werden.

6. Einrichtung zur Bestimmung des störenden Einflusses einer von einem ersten Flugzeug erzeugten Wirbelschleppe für ein zweites, auf dem Flugweg nachfolgendes Flugzeug mit

Durchführung von so häufigen Messungen der Windgeschwindigkeit an Bord von auf dem Flugweg des ersten

Flugzeugs vorher fliegenden Flugzeugen, dass aus den Änderungen der Messergebnisse Daten für die Turbulenz ableitbar sind,

Übermittlung der gemessenen und/oder voraus gewerteten Daten auf Positionen des Flugweges an eine Bodenstation,

Erstellung eines Verlaufs der Turbulenz auf dem Flugweg durch die Bodenstation,

Bestimmung der Stärke der von dem ersten Flugzeug erzeugten Wirbelschleppe unter Verwendung konstruktiver Daten des Typs des ersten Flugzeugs,

Abschätzung des Zerfalls der Wirbelschleppe unter dem Einfluss der bestimmten Turbulenz auf dem Flugweg,

Bestimmung einer Gefährdungsschwelle der Stärke der Wirbelschleppe für das nachfolgende zweite Flugzeug.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

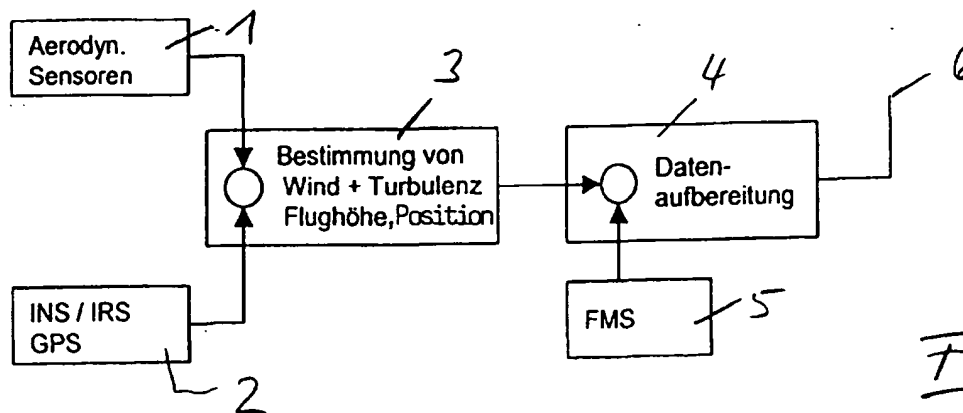


Fig. 1

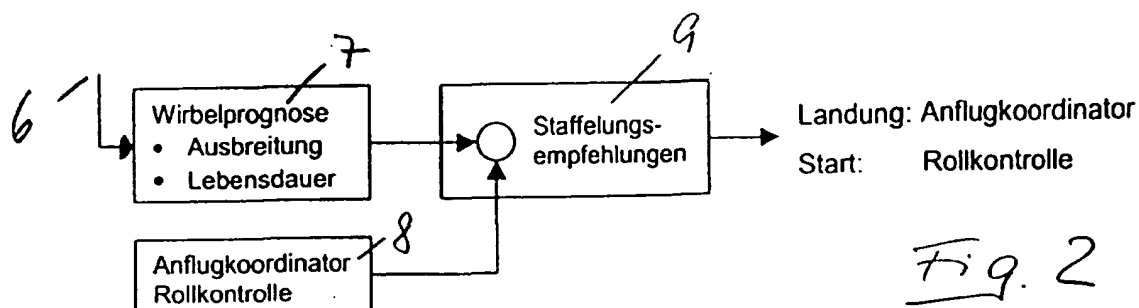


Fig. 2

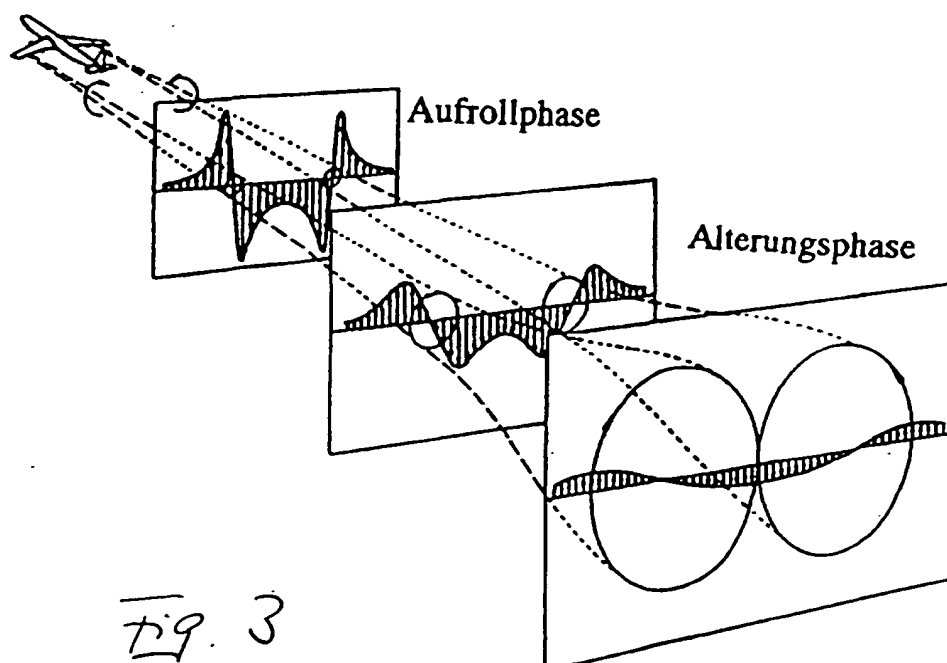


Fig. 3

